

論文の内容の要旨

論文題目 Search for narrow baryonic states in ep collisions at HERA
(HERA の ep 衝突における狭いバリオン束縛状態の探索)

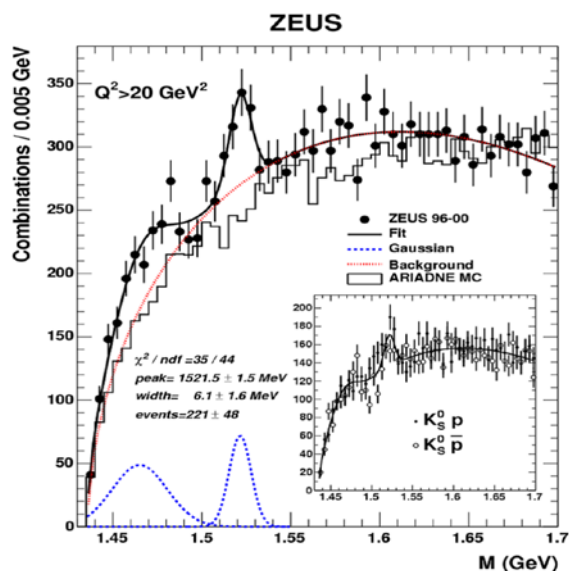
氏名 堀 龍馬

当論文はドイツ・ハンブルクにある DESY 研究所 HERA 加速器での高エネルギー電子・陽子衝突実験 ZEUS が 2003 年から 2007 年までに収集した全データの中に陽子と中性 K 中間子の組み合わせで再構成される新粒子の探索を行った解析に関するものである。

1, 2 章で触れるように、2003 年に日本の Spring-8 研究所において LEPS 実験グループが、不変質量 1.53 GeV 付近にストレンジネス ($S=+1$) を含むバリオンの共鳴状態を報告した。新粒子は Θ と呼ばれ、報告中での反応過程は $\gamma A \rightarrow \Theta^+ \rightarrow K^+ n$ であり、荷電 K 中間子と中性子に崩壊する。2 つの崩壊粒子を構成するクォークの組み合わせが ($uudd\bar{s}$) となり反ストレンジネスクォークが含まれることから、この新粒子 Θ は従来知られている 3 クォークの束縛状態である通常のバリオンとは考えられず、素粒子物理学の標準モデルで許容される 5 クォークの束縛状態 (ペンタクォーク) であると解釈された。この発見報告以後、世界各地で行われていた素粒子実験でこの粒子の探索が行われた。これらの報告の中には存在を肯定する報告と否定する報告が混在する状況であった。

ZEUS 実験では 1996 年から 2000 年までに取得した深非弾性散乱 (DIS) 事象内で DIS での移行運動量の自乗 $Q^2 > 20 \text{ GeV}^2$ の条件で Θ 粒子の探索が行われた。陽子 p と中性 K 中間子 K_S^0 を組み合わせて再構成した不変質量分布上に右図 (図 2.3) の通り 1.52 GeV 付近にピークがあることを報告した。一方で同じ HERA 加速器で同様の実験を行っていた H1 実験では観測されなかった。

私の研究は、その後に ZEUS が収集した、より多くの質の高いデータを使って、 Θ 粒子を再現できるかを調べたものである。



3 章では ZEUS 検出器内の各検出器の機能を説明すると同時に 2000 年の HERA の第一期運転終了後に第二期運転へ向け行われた HERA 加速器と ZEUS 検出器の改良についても説明す

る。解析に影響する部分では加速器側のビーム密度であるルミノシティが以前より向上したことにより、おおよそ三倍の統計量 ($121 \rightarrow 358 \text{ pb}^{-1}$) の取得が可能になった。

ZEUS 検出器の改良の中で特筆すべきは、荷電粒子の飛跡情報をビーム衝突点近傍で取得できるシリコンマイクロバーテックス検出器 (MVD) の挿入が行われたことである。ZEUS 検出器で Θ 粒子を探索する上で重要となるのは陽子 p の同定と中性 K 中間子 K_s^0 の再構成であるが、MVD 挿入による飛跡情報の増加は双方に対する大幅な精度向上をもたらすことが期待された。本解析では以下に説明する様にこの MVD を使用した陽子を粒子同定する手法と K_s^0 を再構成する手法を新たに開発した。

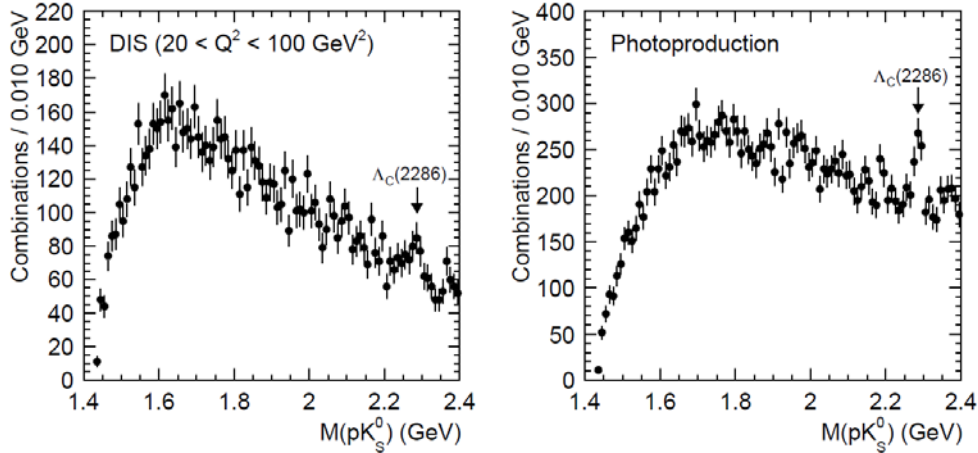
陽子の粒子同定は、4 章 2 節に説明するように dE/dx と呼ばれる検出器のヒット信号から計算する単位長さ当たりのエネルギー損失量を使用する。先の解析では中央飛跡検出器 (CTD) のヒットから計算した dE/dx のみを使用していたが、これと同様に MVD の dE/dx も解析に使用するために MVD のヒット信号の較正作業を行った。MVD はヒットの数が構造上 4-6 個と少ないため、ヒット信号の分布関数から Likelihood を用いて MVD の dE/dx の計算を行う手法を開発した。その結果 MVD の dE/dx も既存の中央飛跡検出器 (CTD) と同程度の精度で使用することが可能となった。5 章 6 節で詳細を説明するが、MVD と CTD、2 つの dE/dx の情報を同時に用いた新しい陽子の同定法を考案し解析に使用した。これは 6 章 4 節でテストされるが、陽子の運動量が 1.0 GeV 付近以上で顕著となる π からの背景事象の混入がより少ない同定法である。

中性 K 中間子 K_s^0 は単純には 2 本の反対の電荷をもった荷電 π 中間子の飛跡を組み合わせることで再構成され、両飛跡のヘリックスパラメータから K_s^0 の不変質量が計算される。今解析では 5 章 5 節で説明する様にヘリックスパラメータから K_s^0 の崩壊バーテックス位置を求め、この位置に制約を持たせた飛跡のフィットを再度掛けることで飛跡のパラメータを精度よく再計算する。また、飛跡に加えてバーテックス位置の情報も用いて事象選択条件を工夫することにより K_s^0 を精度よく再構成する。

この他、4 章は ZEUS 検出器内における事象再構成の方法について、5 章は探索に使用する DIS 事象と光生成事象 (PHP) の事象選択方法、および陽子と K_s^0 に対する事象選択条件を説明した。ここまでの主解析の準備段階となる。

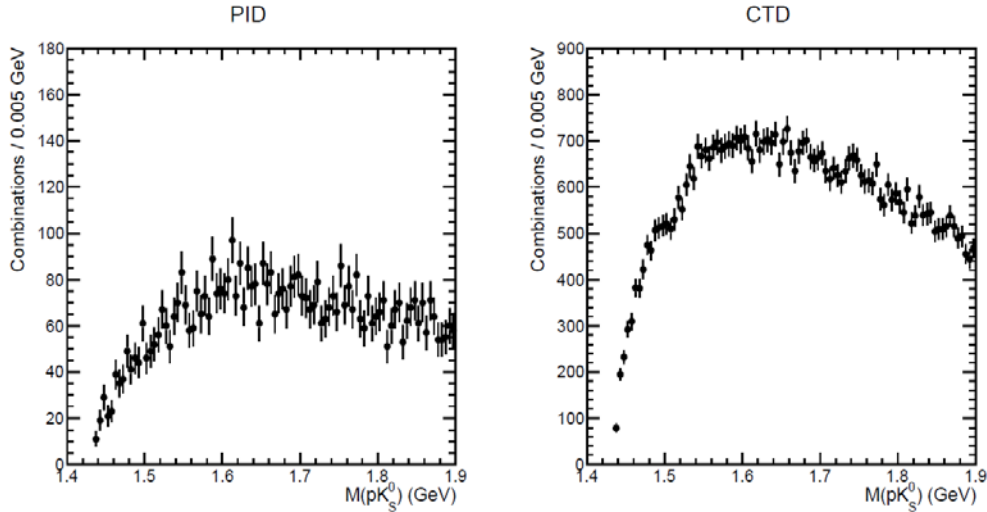
本論文の主解析は 2 つに分けられる。前者は 6 章で説明する Θ 粒子の不変質量分布上のピーク構造の探索であり、後者は 7 章で説明する生成断面積の上限値の計算である。

繰り返しになるが、 Θ 粒子の不変質量分布は陽子 p と K_s^0 の組み合わせで再構成される。選択された DIS 事象と PHP 事象の中に更に p と K_s^0 が含まれる事象を選択し不変質量分布を再構成した。これらの質量分布上に Θ 粒子の探索を行った結果は次図 (図 6. 18) であるが、DIS、PHP 事象ともに Θ 粒子と同様の組み合わせに崩壊する Λ_c 粒子のピークは 2.3 GeV 付近に確認できるが、 1.52 GeV 付近に Θ 粒子の兆候は現れなかった。



加えて Θ 粒子に対し、様々な運動学的領域 (Q^2 、 $p_T(pK_S^0) - |\eta(pK_S^0)|$ 平面での切り分け等) で探索を行ったが、新粒子の存在を示す兆候はなかった。

また、以前の解析と比較するため、解析間で大きな違いのある陽子の同定法を以前の解析に出来るだけ近づけた CTD のみを使用する条件でも探索を行い (下図、図 6.19 右)、今回使用した同定法を用いた不変質量分布 (下図左) と比較した。事象数は大きく増えるものの、こちらも Θ 粒子の兆候はなかった。

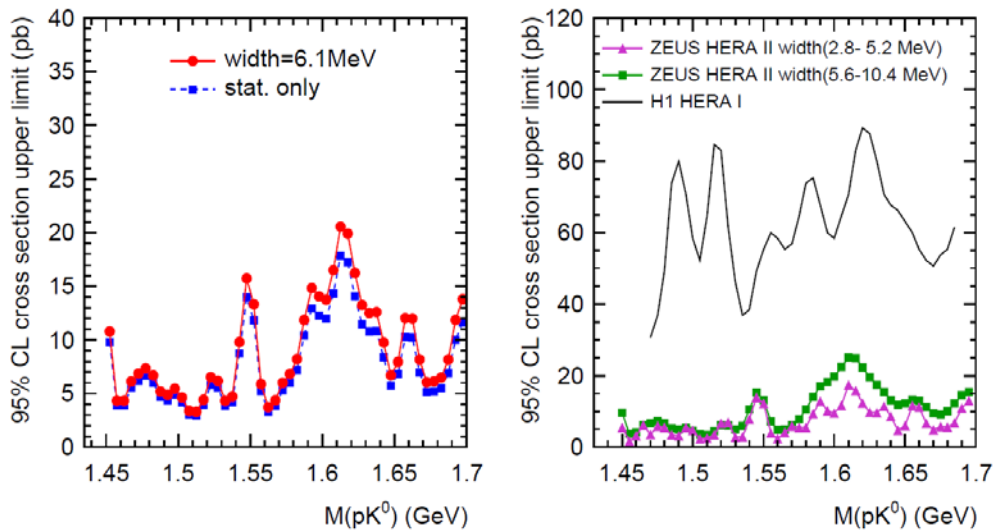


7 章では、 Θ 粒子生成断面積の上限値を求めている。ZEUS と H1 それぞれが行った以前の解析と比較するために、本章では DIS 事象のみを扱い、その運動学的領域を $20 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ 、 $0.5 < p_T(pK_S^0) < 3.0 \text{ GeV}$ 、 $|\eta(pK_S^0)| < 1.5$ とし過去の解析に揃えている。

上限値の計算のため、最初に ZEUS 検出器の検出効率を計算する。この為にモンテカルロ法 (MC) による事象のシミュレーションを用いたが、 Θ 粒子の性質は不明のため既知の Σ 粒子の置き換えによっている。これにより使用する MC のモデルに依存した形ではあるが、検出器効率を補正するための重みが得られる。

この検出効率をもとに、断面積の上限を計算する。重みを加えた不変質量分布に対して、 Θ 粒子の信号をガウス関数 G と仮定し、背景事象の形状関数 A を加えた関数 $(A+G)$ でフィッ

トする。信号幅は ZEUS の以前の結果 (6.1 MeV、下図赤線) と MC から求めた ZEUS 検出器の質量分解能の値 (下図灰色線) とその 2 倍の値 (下図緑線) とする 3 通りを使った。灰色線は H1 が以前の解析の上限値 (下図黒線) を計算する際に使用した Θ 粒子の信号幅に近く結果の比較には有益である。信号数を変えたフィットを繰り返し最小となるカイ 2 乗値を求める。ここから 95%信頼度での断面積上限を求めた。系統誤差は検出器の効率や陽子同定効率、MC モデルの差異等を想定しており、その合計は最大で中心値の 20%程度である。系統誤差を含んだ結果は下図 (図 7.16) に示されるが、H1 の過去の結果 (下図黒線) よりも更に感度が上がったことが分かる。また、6 章と同様に様々な Θ 粒子に対する条件 (電荷別、背景事象形状の変更等) で計算した結果を掲出している。



8 章は結果の総括である。20 < Q² < 100 GeV²、0.5 < p_T (pK_S⁰) < 3.0 GeV、|η (pK_S⁰)| < 1.5 の条件の DIS 事象に対して、不変質量が 1.45 から 1.7 GeV までの範囲で探索し、 Θ 粒子の生成断面積の上限値を 95%信頼度で設定した。1.52 GeV 付近の上限値は 10 pb 以下である。以前の解析で ZEUS が報告した生成断面積は 125 ± 27 (stat.)⁺³⁶₋₂₈ (sys.) であり、その強さの Θ 粒子の信号がある場合に相当するピークが右図 (図 8.3) の点線になる。今回の結果は Θ が存在するとしても前の報告の様な大きな生成断面積であることを明確に否定し、電子・陽子衝突において Θ が生成されるという検証は得られなかった。

